

曹凤娟、焦明若, 2012, 基于层次分析的辽宁地区中强震预测指标体系及效能评估, 中国地震, 28(4), 415 ~ 424。

# 基于层次分析的辽宁地区中强震预测 指标体系及效能评估

曹凤娟 焦明若

辽宁省地震局, 沈阳市皇姑区黄河北大街 44 号 110034

**摘要** 本文从辽宁地区映震效果较好的预测指标出发, 采用层次分析法建立了辽宁地区中强震预测指标体系, 在此基础上, 应用 1~9 比率标度法构建判断矩阵, 进而计算各指标的权重。结果显示, 10 项映震效果较好的指标中, 权重值居前 3 位的分别是短期预测指标中的前震序列、流体异常和  $b$  值。同时层次分析模型也给出了辽宁地区有无中强震的综合判定指标  $Y$ ,  $Y$  值可较好地反映辽宁地区中强震的震兆强弱程度和异常可靠性, 当  $Y \geq 1.41$  时 (若有前震序列, 则  $Y \geq 2.59$ ), 辽宁地区短期内存在发生中强震的危险。

**关键词:** 层次分析 模型 判断矩阵 权重 效能评估

[文章编号] 1001-4683(2012)04-0415-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

1966 年邢台 7.2 级地震后, 我国开始地震预测及相应的研究工作, 相继开展了“七五”、“八五”等地震预测实用化攻关, 逐步形成了“长、中、短、临和震后诸阶段的渐进式预测科学思路(丁国瑜等, 1981; 梅世蓉等, 1993), 并初步建立了一些较为实用有效的预测判据、指标和方法。近年来, 开展了中短期前兆识别准则评价、物理机制和预测模型等方面的研究, 促进了中短期预测向量化、指标化进展(丁鉴海等, 2000; 黄兴伟, 2009), 2011 年中国地震局监测预测司又组织开展了前兆各学科的预测效能评价工作。

合理地评价地震预测效能是许多地震学者一直以来想要解决和探索的问题, 目前人们比较认可和普遍采用的评价方法是许绍燮(1989)提出的  $R$  值评分, 其后又经许多地震学者完善(朱令人等, 1991; 秦卫平, 1991; 石耀霖等, 2000; 郑兆蕊等, 2001; 张国民等, 2002; 罗兰格, 2004; 马宏生等, 2004), 现已成为常规的地震预测效能评价方法,  $R$  值评分针对的是单项指标预测效能的评估。罗平等(1994)用权重集成法将单项指标进行综合, 提出了预测未来 1 年云南地区有无  $M \geq 6$  地震的综合判定指标  $P_1$ , 结论是当  $P_1 \geq 0.27$  时, 未来 1 年云南地区将有  $M \geq 6$  地震发生, 研究成果可试用于年度中期预测。赵翠萍等(2000)通过对新疆天山

[收稿日期] 2012-02-20

[项目类别] 中国地震局“十一五”科技支撑课题“华北构造区强震预测预警技术和指标研究”(2006BAC01B03-04-03)和辽宁省地震局地震预测预警开发重点实验室“辽宁地区中强震预测预警信息平台研建”(LZD1102)共同资助

[作者简介] 曹凤娟, 女, 生于 1970 年, 本科, 高级工程师, 主要从事地震综合分析预测。Email: cao99@sina.com

地区回顾性 PP 回归动态建模预测检验,对其预测效能进行了评价,结果认为,该模型作为时序性数值预测模型具有较好的中短期预测效能。冯德益等(1992)的初步研究结果表明,地震预测依据的不少信息和指标,包括地震活动性指标,都带有灰色模糊的性质,因而综合使用模糊集理论与灰色系统理论的综合方法比每一种方法单独使用更为优越。但在一般性的灰色关联分析中,对各指标采用的是等权处理,它把指标体系中各指标的重要性(权重)设为同等重要,而在地震预测指标体系评估中,由于各指标对预测结果总体效能的影响程度不同,需要对指标体系的权重进行分配,使各指标的重要程度得到体现。层次分析法是一种定性定量相结合、适合于确定指标权重的决策方法。

层次分析法(AHP)是20世纪70年代由美国运筹学家、匹兹堡大学教授TLSaaty提出的系统化的分析方法,广泛用于军事、社会、经济和管理等领域。特别在油料装备、飞机作战系统和机械通气系统的效能评估和指标权重确定中应用较多(徐华等,2004;何乃强等,2011;陈丽丽等,2011)。层次分析法的基本思想是根据问题的性质和要求达到总目标。把问题层次化,建立起一个有序的递阶系统,然后对系统中各相关问题进行两两比较评判,通过这种比较评判结果的综合计算处理,把系统分析归结为最低层相对于最高层的相对重要性权数的确定或相对优劣次序的排序问题(王晓青等,1995;李军涛,2010)。杨马陵等(2010)在对预警等级的风险评估指标和方法研究中,也指出地震预测预警的可信度指标 $R$ 是对地震三要素预测效能、震兆强弱程度和异常可靠性的总体评价。可使用层次分析、模糊集值评价等方法,根据不同的地震预测方法的异常指标进行计算而获得。

本文从辽宁地区映震效果较好的长、中、短(临)预测指标出发,建立基于层次分析的指标体系模型,采用1~9比率标度法构建判断矩阵,在此基础上对各指标进行定性和定量分析,评估各指标在辽宁地区中强震预测指标体系中的贡献,为辽宁地区震情趋势判定提供借鉴和指导。

## 1 指标体系研究

目前,尽管地震预测没有取得实质性的突破,但根据现有观测资料及经验,我国逐渐形成了“长(数年至二三十年)、中(一到数年)、短(数月以内)、临(数天至几十天)”的渐进式地震预测模式;采用“以场求源”的预测思路,建立了较为系统的经验性地震预测的方法、指标和判据体系(丁鉴海等,2000)。

基于1970年以来辽宁及邻区发生的6次 $M \geq 5.0$ 地震(即1975年2月4日海城7.3级、1978年5月18日营口5.9级、1980年1月8日朝鲜天摩山5.7级、1982年2月14日朝鲜殷栗5.4级、1999年11月29日岫岩5.4级和2003年8月16日内蒙巴林左旗5.9级地震。不包括余震),作者系统总结了辽宁地区中强震前异常显示突出的各类预测指标,将其作为构建辽宁地区中强震预测指标体系的基础。研究中用Mapsis软件对这6次中强震前相对独立的测震学参数进行时空扫描(时间范围:震前1个月~5年;空间范围: $38^{\circ} \sim 44^{\circ} \text{N}$ 、 $119^{\circ} \sim 126^{\circ} \text{E}$ ;起算震级: $M_L \geq 2.5$ )。

结果发现缺震、 $A(b)$ 值、 $b$ 值和 $XY$ 值4参数震前映震效果较好,且此4参数的物理意义较明确,可很好地表征区域地震活动特性。其中 $XY$ 值源于地震学界的临界点理论,反映的是非线性系统失稳的前兆,用于强震的中期预测,并在实践中取得了较好的效果(尹祥础

等,1991,1994)。所谓临界点理论,即在临界状态,外界的触发因素将起重要作用。较小的附加应力,如日月引潮力便足以触发孕震区的地震,尤其是中小地震的发生。 $b$  值作为描述震级-频度关系的最基本参数,可较好的反映区域介质的地质构造、非均匀性和应力状态等,通常在破裂发展的后期,震级-频度关系偏离线性,可作为大震的一种前兆信息(杜异军等,1986)。此外,多数大震前,在震中区或较大区域内,中小地震会出现某种特征性的图像(空区和条带等),这些特征图像的形成和其构造环境有关,可能反映区域构造应力作用过程,也可能为地震预测提供信息。因此,将上述这些可反映区域构造和介质特性的参数综合起来作为辽宁地区有无中强震的地震学预测指标(表 1)。

众所周知,辽宁地区有过两次成功预报的震例,即 1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级和 1999 年 11 月 29 日岫岩 5.4 级地震。前震序列在这两次地震成功预测中发挥了相当大的主导作用,因此前震序列可作为辽宁地区  $M \geq 5.0$  地震前最典型的地震学指标(王安东等,2000)。研究发现,辽宁地区历次中强地震前朝阳倾斜、营口倾斜、金州短水准等指标都有一定的中期异常显示,尤其朝阳倾斜,可作为辽宁地区有无中强震的标志性形变异常(王玉莹等,2008)。震例研究也发现,辽南地区的部分流体观测指标(如盘锦水氦、荣二井水位、丹东水氦,高七井水位等)在辽宁地区的中强震前 3 个月左右异常反应较明显,且群集性和同步性较好(王海燕,2000)。因此可将辽宁地区的流体异常( $\geq 3$  台次)作为短期前兆学预测指标。由于辽宁地区的电磁学科观测点有限(全省约 4~5 个),已有的震例总结中尚未发现明显的震前异常,因此在构建辽宁地区中强震预测指标体系中暂未列入电磁学科异常指标。宏观异常在辽宁地区中强震前也有很好的显示,一般在震前 1 个月左右开始陆续出现,异常范围和数量逐渐增多(一般大于 10 项),且随着发震时间的临近,异常区逐渐向震中附近收缩(朱凤鸣等,1982)。

## 2 效能评估模型的建立

针对辽宁地区映震效果较好的 10 项预测指标(表 1),在震级和区域已定,只考虑时间(长、中、短(临))的情况下,可以利用层次分析法确定辽宁地区中强震预测指标体系模型(图 1)。在此基础上结合各指标映震能力高低和指数标度法确定指标的权重系数,进而评估指标体系中各指标的预测效能。

表 1 辽宁地区中强震前各指标映震情况

| 映震指标     | 发震年份        | 1975   | 1978   | 1980    | 1982   | 1999   | 2003     | 对应<br>次数 |
|----------|-------------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|----------|
|          | 地震名称<br>及震级 | 海城 7.3 | 营口 5.9 | 天摩山 5.7 | 殷栗 5.4 | 岫岩 5.4 | 巴林左旗 5.9 |          |
| 空区/条带    |             | √      | √      | √       | √      | √      | √        | 6        |
| 缺震       |             | √      | √      | √       |        | √      | √        | 5        |
| $A(b)$ 值 |             | √      | √      | √       |        | √      |          | 4        |
| $b$ 值    |             |        | √      | √       | √      | √      | √        | 5        |
| $XY$ 值   |             | √      | √      | √       |        | √      | √        | 5        |
| 宏观异常     |             | √      | √      |         |        | √      |          | 3        |
| 前兆异常(形变) |             | √      | √      |         |        | √      | √        | 4        |
| 前兆异常(流体) |             | √      | √      | √       |        | √      | √        | 5        |
| 前震序列     |             | √      |        |         |        | √      |          | 2        |

注:√表示震前有异常显示

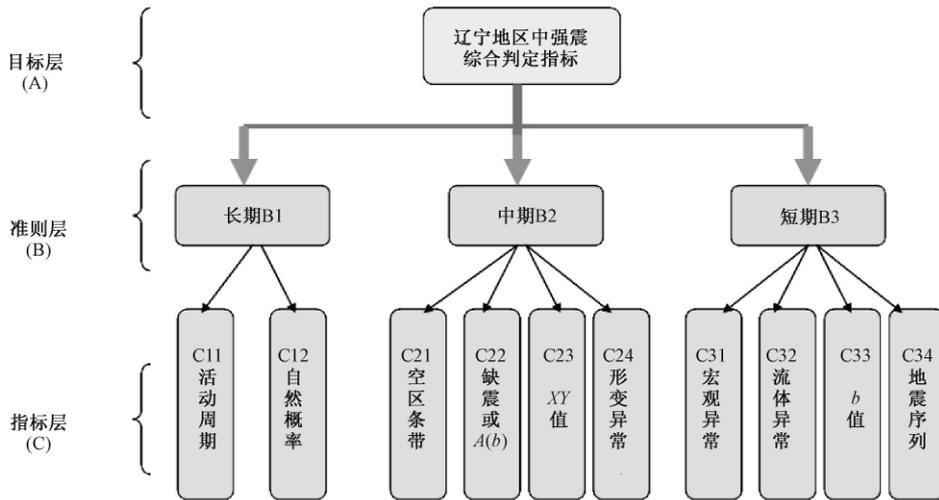


图1 辽宁地区中强震预测指标体系(震级和区域已定)

其中:

目标层 A: 辽宁地区有无中强震综合判定指标;

准则层 B: 不同时间尺度的预测准则(长期 B1、中期 B2、短期 B3);

指标层 C: 震例研究提取的映震效果较好的预测指标(地震条带、空区、缺震、前兆异常……)。

长期 C1: 活动周期、发震的自然概率等;

中期 C2: 震前 3 个月~1 年开始出现的映震效果较好的预测指标, 如空区、条带等;

短期 C3: 震前数天~3 个月开始出现的映震效果较好的预测指标, 如前兆异常和前震序列等。

### 3 指标无量纲化处理

#### 3.1 指标无量纲化

在层次分析过程中, 最重要的步骤是指标体系无量纲化处理和同一层次各元素的重要性进行两两比较, 从而构造判断矩阵。

首先, 将指标体系中 C 层各类指标转化为无量纲的 4 个等级, 以 1~4 表示, 数值越高, 表示发生预期地震的可能性(对某种预测方法可以是对应率的高低)越大。1~4 分别对应较低、一般、较高、高等 4 种发震可能性的内涵(曹凤娟等, 2010)。具体为

- ①有异常, 不突出或不能完全排除干扰, 震例效果较好;
- ②有异常, 不突出或不能完全排除干扰, 震例效果好; 或异常较显著, 震例效果较好;
- ③异常显著, 震例效果较好; 或异常较显著, 震例效果好;
- ④异常显著, 异常表现符合标准, 震例效果好。

数字化后的指标层各指标分别记为  $x_{ij}$ , 权重记为  $w_{ij}$ , 其中  $i$  代表准则层,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j$  代表指标层,  $j = 1, 2, \dots, n$ 。

然后,用“成对比较法”(刘树枫等,2001)将定性或定量的各个指标数字化并求权重。即比较各个指标对同一目标的影响,确定它们在目标中占的权重,因为,不同准则对于不同的决策有不同的重要程度,而不同的因素在相同的准则上也有不同的适合程度。层次结构反映了因素之间的关系,但准则层中的各准则在目标衡量中所占的比重并不一定相同。

所谓成对比较法,就是如果要比较  $n$  个因素  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  对同一目标的影响,每次取两个因素  $y_i$  和  $y_j$ ,  $a_{ij}$  表示  $y_i$  和  $y_j$  对目标的影响程度之比,其中  $a_{ij}$  的取值由 Saaty 的 1~9 比率标度法(张伟等,2010;钟江荣等,2010;高晓霞,2010)决定(表 2)。

表 2 1~9 比率标度法

| 标度      | 含 义   |
|---------|---|
| 1       | 表示两个元素相比,同等重要   |
| 3       | 表示两个元素相比,前者比后者稍重要   |
| 5       | 表示两个元素相比,前者比后者明显重要  |
| 7       | 表示两个元素相比,前者比后者强烈重要  |
| 9       | 表示两个元素相比,前者比后者极端重要  |
| 2,4,6,8 | 表示上述相邻判断的中间值  |
| 倒数      | 若元素 $y_i$ 与元素 $y_j$ 的重要性之比为 $a_{ij}$ ,那么元素 $y_j$ 与元素 $y_i$ 重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ |

### 3.2 判断矩阵构建与权重系数计算

设上一层的元素为  $B$ ,对下一层元素  $u_1, \dots, u_n$ ,两两(成对)比较  $u_1, \dots, u_n$  对  $B$  的相对重要性,形成比较矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。如比较  $U = \{u_1, \dots, u_4\}$  时,  $u_1$  与  $u_4$  相比,  $u_4$  强烈重要,则取  $a_{14} = 1/7, a_{41} = 7$ ;  $u_3$  与  $u_2$  相比,  $u_2$  重要,则取  $a_{23} = 1/2, a_{32} = 2$ 。

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 & 1/7 \\ 5 & 1 & 2 & 1/3 \\ 3 & 1/2 & 1 & 1/5 \\ 7 & 3 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

当得到量化的判断矩阵后,采用“最大特征根法”计算权重系数,最后对判断矩阵进行一致性检验,满足一致性要求才能使用。记  $\lambda_{\max}$  为  $A$  的最大特征根,权重向量为  $AW = \lambda_{\max} W$ ,在计算权重系数  $w_{ij}$  前,首先需要计算矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$  和一致性指标  $CI$ 。

由于主观因素的存在,任何判断矩阵都不可能完全达到一致,于是提出了随机性指标  $RI$  (Random Index)(顾全根,2008)。对应矩阵阶数  $n$  为 1~10 时,相应的平均随机一致性指标  $RI$  值如表 3(刘小芳等,2009;张彬等,2010)。

表 3 矩阵阶数与一致性指标  $RI$  对照表

| 矩阵阶数 $n$ | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|----------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $RI$     | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

通常一致性检验的步骤如下:

(1) 计算一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

(2) 求出平均随机一致性指标

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式(1)中  $n$  为判断矩阵的阶数,  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值,  $CI$  为一致性指标; (2) 式中  $RI$  为平均随机一致性指标,  $CR$  为随机一致性比例。一般而言, 1 或 2 阶的判断矩阵总具有完全一致性。对于 2 阶以上的判断矩阵, 当判断矩阵的随机一致性比例  $CR < 0.10$  时, 就认为判断矩阵具有令人满意的一致性; 否则需要调整判断矩阵  $A$ , 直到满意为止(唐飞等, 2010)。

对于上述矩阵  $A$ , 解得其最大特征值  $\lambda_{\max} = 4.0776$ , 权重向量  $W = (0.056, 0.239, 0.131, 0.574)^T$ ,  $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (4.0776 - 4) / (4 - 1) = 0.026$ , 查表有  $RI(4) = 0.90$ , 则  $CR = CI/RI = 0.026/0.90 = 0.029 < 0.1$ , 得知矩阵的一致性可以接受。

### 4 实例分析

表 4 为辽宁地区中强震预测指标体系(图 1)中 C 层指标的 1~4 等级的无量纲化结果。

借助 1~9 比率标度法, 参照 3.2 节中判断矩阵  $A$  的构建方法, 建立长期、中期和短期指标层对准则层的判断矩阵及其权重计算结果如表 5~7。

解得表 6、7 中矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$  分别为 4.0606 和 4.1592,  $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$  分别为 0.020 和 0.053, 查表  $RI(4) = 0.90$ , 则  $CR = CI/RI$  分别为 0.022 和 0.059, 均小于 0.1, 因此中期和短期矩阵的一致性可以接受。

之后, 记准则层 B 各准则为  $y_i$ , 权重记为  $w_i$ , 其中  $i$  代表准则层,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 是准则的个数。将各准则对应的指标的数值与相应的权重相乘并线性求和, 有

$$y_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}w_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

由(1)式计算得到辽宁地区指标层 C 对准则层 B 的计算结果  $y_1$  (长期准则)、 $y_2$  (中期准则) 和  $y_3$  (短期准则), 见表 8。

在此基础上, 构造长、中、短期准则层 B 对目标层 A 的比较矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/7 \\ 5 & 1 & 1/3 \\ 7 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

解得该矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max} = 3.0649$ , 权向量  $W = (0.072, 0.279, 0.649)^T$ ,  $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (3.0649 - 3) / (3 - 1) = 0.035$ , 查表有  $RI(3) = 0.58$ , 则  $CR = CI/RI =$

表 4 辽宁地区中强震预测指标无量纲化

| C 层       | $X_{ij}$     |      |
|-----------|--------------|------|
|           | 名称           | 无量纲化 |
| 长期<br>C1j | C11 活动周期     | 2    |
|           | C12 自然概率     | 1    |
| 中期<br>C2j | C21 空区/条带    | 2    |
|           | C22 A(b)值/缺震 | 2    |
|           | C23 XY值      | 3    |
|           | C24 形变异常     | 3    |
| 短期<br>C3j | C31 宏观异常     | 2    |
|           | C32 流体异常     | 3    |
|           | C33 b值       | 3    |
|           | C34 地震序列     | 3    |

表 5 长期预测指标判断矩阵和权重

| 长期预测指标 | 活动周期 | 自然概率 | 权重 $w_k$ |
|--------|------|------|----------|
| 活动周期   | 1    | 1/3  | 0.75     |
| 自然概率   | 1/3  | 1    | 0.25     |

表 6 中期预测指标判断矩阵和权重

| 中期预测指标   | 空区/条带 | A(b)值/缺震 | XY值 | 形变异常 | 权重 $w_k$ |
|----------|-------|----------|-----|------|----------|
| 地震空区/条带  | 1     | 1/2      | 1/2 | 1    | 0.169    |
| A(b)值/缺震 | 2     | 1        | 1   | 1    | 0.288    |
| XY值      | 2     | 1        | 1   | 2    | 0.338    |
| 形变异常     | 1     | 1        | 1/2 | 1    | 0.205    |

表 7 短期预测指标判断矩阵和权重

| 短期预测指标 | 宏观异常 | 流体异常 | b值  | 前震序列 | 权重 $w_k$ |
|--------|------|------|-----|------|----------|
| 宏观异常   | 1    | 1/3  | 1/4 | 1/7  | 0.061    |
| 流体异常   | 3    | 1    | 2   | 1/4  | 0.209    |
| b值     | 4    | 1/2  | 1   | 1/3  | 0.169    |
| 前震序列   | 7    | 4    | 3   | 1    | 0.561    |

$0.035/0.58 = 0.060 < 0.1$ , 得知矩阵的一致性可以接受。

表 8 辽宁地区指标层 C 对准则层 B 的计算结果

| C 层       | Cij |           |      | 对准则层<br>权重 $W_{ij}$ | $y_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}w_{ij}$ |
|-----------|-----|-----------|------|---------------------|-----------------------------------|
|           | 代码  | 指标名称      | 指标量化 |                     |                                   |
| 长期<br>C1j | C11 | 活动周期      | 2    | 0.75                | $y_1 = 1.75$                      |
|           | C12 | 自然概率      | 1    | 0.25                |                                   |
| 中期<br>C2j | C21 | 地震空区/条带   | 2    | 0.169               | $y_2 = 2.54$                      |
|           | C22 | A(b) 值/缺震 | 2    | 0.288               |                                   |
|           | C23 | XY 值      | 3    | 0.338               |                                   |
|           | C24 | 形变异常      | 3    | 0.205               |                                   |
| 短期<br>C3j | C31 | 宏观异常      | 2    | 0.061               | $y_3 = 2.94$                      |
|           | C32 | 流体异常      | 3    | 0.209               |                                   |
|           | C33 | b 值       | 3    | 0.169               |                                   |
|           | C34 | 地震序列      | 3    | 0.561               |                                   |

准则层 B 对目标层 A 的计算有：

$$Y = \sum_{i=1}^m y_i w_i = \sum_{i=1}^m w_i \sum_{j=1}^n x_{ij} w_{ij} \quad (4)$$

依据公式(4), 结合表 8 中长期、中期和短期判定指标  $y_1$ 、 $y_2$  和  $y_3$  的值及其相应权重 0.072、0.279 和 0.649 (表 9), 最终计算可得到辽宁地区中强震综合判定指标极值

$$Y = 1.75 \times 0.072 + 2.54 \times 0.279 + 2.94 \times 0.649 = 2.74$$

最后由公式(5)可得到指标层 C 对目标层 A 的权重  $P_{ij}$  (表 10)。

$$P_{ij} = w_i^{(k)} w_{ij}^{(k-1)} \quad (5)$$

这里  $w_i^{(k)}$  代表 B 层的权重,  $w_{ij}^{(k-1)}$  代表 C 层的权重,  $P_{ij}$  代表指标层对目标层的权重。

对层次总排序也需作一致性检验, 这是因为虽然各层次均已经过层次单排序的一致性检验, 这些判断矩阵也都已经具有较为满意的一致性。但当综合考虑时, 各层次的非一致性仍有一定的可能性, 引起最终的分析结果较为严重的非一致性 (高晓霞, 2010)。

设 B 层中与  $A_j$  相关的因素的成对比较判断矩阵在单排序中经一致性检验, 求得单排序一致性指标为  $CI(j)$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ), 相应的平均随机一致性指标为  $RI(j)$ , 其中  $CI(j)$ 、 $RI(j)$  已在层次单排序时求得, 则层次总排序随机一致性比例为

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m CI(j) w_j}{\sum_{j=1}^m RI(j) w_j} = \frac{0.279 \times 0.020 + 0.649 \times 0.026}{0.279 \times 0.9 + 0.649 \times 0.9} = 0.027 < 0.10$$

因此总排序也满足一致性检验。

表 9 辽宁地区准则层 B 对目标层 C 的权重

| A     | 长期 B1 | 中期 B2 | 短期 B3 | 权重 W  |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 长期 B1 | 1     | 1/5   | 1/7   | 0.072 |
| 中期 B2 | 5     | 1     | 1/3   | 0.279 |
| 短期 B3 | 7     | 3     | 1     | 0.649 |

表 10 辽宁地区中强震预测指标体系中各级指标权重

| 目标 A                     | A 层权重 $P_{ij}$ | 准则 B | B 层权重 $W_i$ | 指标 C      | C 层权重 $W_{ij}$ |
|--------------------------|----------------|------|-------------|-----------|----------------|
| 辽宁地区中强震<br>综合判定指标<br>Y 值 | 0.054          | 长期   | 0.072       | 活动周期      | 0.75           |
|                          | 0.018          |      |             | 自然概率      | 0.25           |
|                          | 0.047          | 中期   | 0.279       | 地震空区/条带   | 0.169          |
|                          | 0.080          |      |             | A(b) 值/缺震 | 0.288          |
|                          | 0.094          |      |             | XY 值      | 0.338          |
|                          | 0.057          |      |             | 前兆异常(形变)  | 0.205          |
|                          | 0.040          | 短期   | 0.649       | 宏观异常      | 0.061          |
|                          | 0.136          |      |             | 前兆异常(流体)  | 0.209          |
|                          | 0.110          |      |             | b 值       | 0.169          |
|                          | 0.364          |      |             | 前震序列      | 0.561          |

## 5 结果分析

为了检验层次分析模型在辽宁地区历次中强震前的预测结果,按照表 1 给出的 6 次地震前的异常项目和表 10 中给出的各级(层)指标(准则)权重,由公式(4)计算得到历次中强震前综合判定指标 Y 值见表 11。

表 11 辽宁地区历次中强震前综合预测指标 Y 检验结果

| 时间<br>(年-月-日) | 地点    | 震级<br>$M_s$ | 异常项数 | 综合判定指标 Y |
|---------------|-------|-------------|------|----------|
| 1975-02-04    | 辽宁海城  | 7.3         | 9    | 2.59     |
| 1978-05-18    | 辽宁营口  | 5.9         | 9    | 1.58     |
| 1980-01-08    | 朝鲜天摩山 | 5.7         | 7    | 1.41     |
| 1982-02-14    | 朝鲜殷栗  | 5.4         | 4    | 0.77     |
| 1999-11-29    | 辽宁岫岩  | 5.4         | 10   | 2.74     |
| 2003-08-16    | 内蒙巴林左 | 5.9         | 7    | 1.41     |

由表 11 可以看出,当指标体系中的所有 10 项异常指标都满足时,此时综合判定指标 Y 值最大,为 2.74,如 1999 年 11 月 29 日岫岩 5.4 级地震前(表 1)。Y 值最小的是 1982 年 2 月 14 日朝鲜殷栗 5.4 级地震,  $Y=0.77$ ,异常数量只有 4 项(表 1)。通常 Y 值和异常数量有关,异常数量越多, Y 值越大。但我们发现,1975 年海城 7.3 级和 1978 年营口 5.9 级地震前的异常数量均为 9 项,而 Y 值却相差很大。究其原因主要是两次地震前缺少的异常项目在模型中所占的权重不同,海城地震前 b 值异常不明显,营口地震前缺少前震序列,而 b 值和前震序列在模型中所占的权重分别为 0.110 和 0.364(表 10)。可见该评估模型在以往由异常频次来分析判定震情的基础上更进了一步。尽管只有 6 次震例,但我们也不难发现,5 次地震前的  $Y \geq 1.41$ 。1982 年朝鲜阴栗地震例外,这不仅与此次地震距离辽宁较远,大部分前兆异常都没有显示有关,可能也与其位于边境地区,小震记录不全有关。但无论如何, Y 值可较好的反映辽宁地区中强震的震兆强弱程度和异常可靠性,因此可将  $Y=1.41$  作为中强震的临界判定指标,即当  $Y \geq 1.41$  时(若有前震序列,则  $Y \geq 2.59$ ),辽宁地区短期内存在发生中强震的危险。

## 6 讨论与结论

(1) 由于辽宁地震台网的大部分数字观测资料开始于 2000 年前后,观测以来中强震例

较少(只有 1999 年岫岩 5.4 级地震前有部分数字资料),处于探索和积累经验阶段。因此在本次建立辽宁地区中强震预测指标体系模型时暂没考虑数字资料,即便目前选定的一些异常指标也只是从几次震例的总结中提炼的,有待进一步完善和检验。

(2) 理论上地震预测的内容包括地震发生的时间、地点和强度三要素,而且各要素的评价指标都具有层次结构,因此需要采用多层次单目标的决策方法。但本研究应用层次分析建立的辽宁地区中强震预测指标体系模型,是在地点(辽宁地区)和震级( $M \geq 5.0$ )基本确定的情况下基于时序分析来建立的。

(3) 本研究通过层次分析法确立评估指标权重,层次分析法通过逐层比较相关因素,逐层检验结果的合理性,将专家的主观判断给予量化处理,并使用一致性检验来验证分值的准确性,避免了简单赋值的主观随意性,使结果更加精确,切实提高了评估结果的准确性和有效性(陈丽丽等,2011)。研究结果显示,长期、中期和短期指标在整个预测指标体系中的权重分别为 0.072、0.279 和 0.649。10 项映震效果较好的指标中,权重值居前 3 位的分别是短期预测指标中的前震序列、流体异常、 $b$  值,权重值分别为 0.364、0.136、0.110,权重位于第 4 位的是中期指标中的加卸载响应比  $XY$  值(0.094),可见辽宁地区中强震预测中对震情判定贡献最大的是短期指标,其次是中期指标(表 10)。

(4) 各指标权重判断矩阵均具有满意的一致性( $CR < 0.1$ ),表明各评估指标权重的设置是合理、科学和有效的。除了前震序列,流体异常群集性和同步转折、 $b$  值、加卸载响应比  $XY$  值等权重评估较高的指标也可为辽宁地区中强震预测提供定量依据和参考。同时,层次分析模型给出了辽宁地区有无中强震综合判定指标  $Y$  值, $Y$  值可较好的反映辽宁地区中强震的震兆强弱程度和异常可靠性,因此可将  $Y = 1.41$  作为中强震的临界判定指标,即当  $Y \geq 1.41$  时(若有前震序列,则  $Y \geq 2.59$ ),辽宁地区短期内存在发生中强震的危险。

## 参考文献

- 陈丽丽、李红、李娜,2011,基于层次分析法的机械通气系统效能评估指标权重的确定,中国实用护理杂志,27(16),60~62。
- 曹凤娟、焦明若、王海燕等,2010,基于层次分析的辽宁地区震情指标预警模型研究,华南地震,30(2),88~96。
- 丁国瑜、梅世蓉、马宗晋,1981,地震预测方法,国际地震预测讨论会论文集,413~415,北京:地震出版社。
- 丁鉴海、刘杰、余素荣,2000,中国地震预测探索与实践,地震,20(2),12~17。
- 杜异军、马瑾,1986,“ $\lambda$ ”字式断层声发射  $b$  值及震级-频度关系的物理意义,地震地质,8(2),1~20。
- 冯德益、林命周、顾瑾平等,1992,模糊集理论与灰色系统理论在地震预测中的综合应用,地震学报,14(3),257~264。
- 高晓霞,2010,层次分析法在高职学生就业推荐中的应用,读与写杂志,7(12),46~47。
- 顾全根,2008,基于层次分析法的财务预警指标权重设置方法,统计与决策,23,176~178。
- 黄兴伟,2009,如何看待我国地震预测研究在防震减灾中的作用,国际地震动态,(6),24~31。
- 何乃强、惠晓滨、周璇等,2011,基于指数标度的飞机作战系统效能评估模型,航空维修与工程,1,58~60。
- 罗兰格,2004, $R$  值评分方法的再研究,华北地震科学,22(2),1~5。
- 罗平、范杨、陈立德等,1994,云南地区近期强震危险区定量指标体系的研究,地震学报,16(2),168~174。
- 李军涛,2010,基于层次分析与模糊综合评判的突出危险程度预测,煤矿安全,(8),101~104。
- 刘小芳、唐永林,2009,基于层次分析法的企业预警指标及其权重的确定,科技情报开发与经济,19(36),80~81。
- 刘树枫、袁海林,2001,环境预警系统的层次分析模型,陕西师范大学学报(自然科学版),29,132~135。
- 梅世蓉、冯德益、张国民等,1993,中国地震预测概论,北京:地震出版社。
- 马宏生、刘杰、吴昊,2004,基于  $R$  值评分的年度地震预测能力评价,地震,24(2),31~37。

- 秦卫平, 1991, 一维地震预测评分问题, 地震学报, **13**(2), 234 ~ 242。
- 石耀霖、刘杰、张国民, 2000, 对我国 90 年代年度地震预测的评估, 中国科学院研究生院学报, **17**(1), 63 ~ 69。
- 唐飞、胡隆华、霍然等, 2010, 基于层次分析法的城中村区域火灾风险评估模型, 消防科学与技术, **29**(6), 533 ~ 537。
- 王晓青、高孟潭, 1995, 中长期地震预测方案综合信度评价的层次分析法, 中国地震, **11**(3), 257 ~ 265。
- 王玉莹、王爱东、赵永志等, 2008, 中强地震前朝阳地震台地倾斜异常特征分析, 东北地震研究, **24**(1), 1 ~ 7。
- 王安东、谷光裕、黄河, 2000, 1999 年 11 月 29 日和 2000 年 1 月 12 日辽宁省海城 - 岫岩 5.4 和 5.1 级地震, 中国震例 1997 ~ 1999, 429 ~ 467, 北京: 地震出版社。
- 王海燕, 2000, 岫岩 - 海城 5.6 级地震前的水化学异常, 东北地震研究, **16**(2), 56 ~ 60。
- 许绍燮, 1989, 地震预测能力评分, 地震预测方法实用化研究文集 - 地震学专辑, 586 ~ 589, 北京: 学术书刊出版社。
- 徐华、汪涛, 2004, 多指标综合评估体系在油料装备效能评估中的应用, 重庆工业高等专科学校学报, **19**(2), 57 ~ 59。
- 尹祥础、尹灿, 1991, 非线性系统的失稳前兆与地震预测, 中国科学, **B**(5), 512 ~ 518。
- 尹祥础、陈学忠、宋治平等, 1994, 加卸载响直比理论(LURR)一种新的地震预测方法, 地球物理学报, **37**(6), 767 ~ 775。
- 朱令人、朱成熹、洪时中, 1991, 地震预测效能评价, 见: 国家地震局科技监测司, 中国地震预测方法研究, 34 ~ 45, 北京: 地震出版社。
- 朱凤鸣、吴戈, 1982, 一九七五年海城地震, 北京, 地震出版社。
- 杨马陵、沈繁奎、陈大庆等, 2010, 地震预测预警等级风险评估与分区分级发布方案的研究, 灾害学, **25**(4), 1 ~ 4。
- 郑兆蕊、李罡风、汪雪泉, 2001, *R* 值评分再学习, 地震学报, **21**(1), 27 ~ 31。
- 张国民、刘杰、石耀霖, 2002, 年度地震预测能力的科学评价, 地震学报, **24**(5), 525 ~ 532。
- 张伟、张莉, 2010, 层次分析法在西气东输工程地质灾害风险评估中的应用, 石油工程建设, **36**(4), 4 ~ 8。
- 张彬、张佳, 2010, 基于最优传递矩阵的层次分析法在桥梁震害评估中的应用, 灾害学, **25**(3), 32 ~ 36。
- 赵翠萍、王海涛, 2000, 新疆天山地区 PP 回归综合预测模型研究及预测效能评价, 地震, **20**(4), 79 ~ 85。
- 钟江荣、张令心、赵振东等, 2010, 基于震害的地震次生火灾高危区模型研究, 地震工程与工程振动, **30**(3), 108 ~ 114。

## Efficiency evaluation of prediction indicators for medium-strong earthquakes in the Liaoning area based on analytic hierarchy

Cao Fengjuan Jiao Mingruo

Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110034, China

**Abstract** Prediction index system model of medium-strong earthquakes in Liaoning is established using analytic hierarchy based on better predictors reflecting the earthquake in Liaoning. On this basis, we built the judgment matrix with 1 ~ 9 ratio scale and then calculated the weight of each index. The results showed that the top three weight indicators were the foreshock sequence, fluid anomalies and *b* value in short-term predictors among 10 better predictors reflecting the earthquake. The analytic hierarchy process model also indicated that comprehensive predication index *Y* with medium-strong earthquakes in the Liaoning area, *Y* value can better reflect the strong or weak of earthquake precursor and abnormal reliability in Liaoning area. When  $Y \geq 1.41$  (If there is a foreshock sequence then  $Y \geq 2.59$ ), medium-strong earthquakes will be likely to occur in Liaoning in a short-term.

**Key words:** Analytic hierarchy Model Judgment matrix Weight Efficiency evaluation